

## Felső végtag kinematikai modelljének rekonstrukciója kétkaros rehabilitációs robot szerszámkoordináta-rendszerei alapján

### Tool center point frame based reconstruction of the upper limb kinematic model in a dual-arm rehabilitation robot scenario

SZIGETI Tamás<sup>1</sup>, HERKE György<sup>1</sup>, TÓTH András<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gyártástudomány- és Technológia Tanszék

Cím: 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.T épület 4. emelet

Tel: 06/1-463-2515, Fax: 06/1-463-3176

E-mail: [info@manuf.bme.hu](mailto:info@manuf.bme.hu)

Honlap: <http://www.manuf.bme.hu>

#### Kivonat

*A stroke miatt bekövetkezett felső végtagi funkcióvesztés robotos gyógytornáztatással történő rehabilitációja során a végtag kinematikai modelljének rekonstrukciója a betegek automatikus állapotfelmérésének és a robotos gyógytorna gyakorlatok személyre szabásának alapja. A célul kitűzött feladat a modell állandó anatómiai paramétereinek: az alkar, a felkar, és a kézfej hosszának, valamint a változó anatómiai paramétereinek: a váll, a könyök, a csukló helyzetének, majd belőlük az anatómiai szögeknek a meghatározása. A bemutatott kinematikai modell rekonstrukcióhoz nincs szükség előzetes manuális felmérés vagy külső érzékelők által szolgáltatott adatokra, kizárólag az alkarhoz és kézfejhez a könyök, illetve kézfej ortéziseken keresztül csatlakozó egy-egy robotkar szerszámkoordináta-rendszereinek az adataira. Először síkban, két dimenzióban kerül bemutatásra a modell rekonstrukciós algoritmusa, amelyet CAD rendszerben előállított virtuális végtagmodellel ellenőrzünk. Ezt követően kiterjesztjük a rekonstrukciós algoritmust három dimenzióra. A matematikai számításokat Wolfram Mathematica rendszerben hajtjuk végre.*

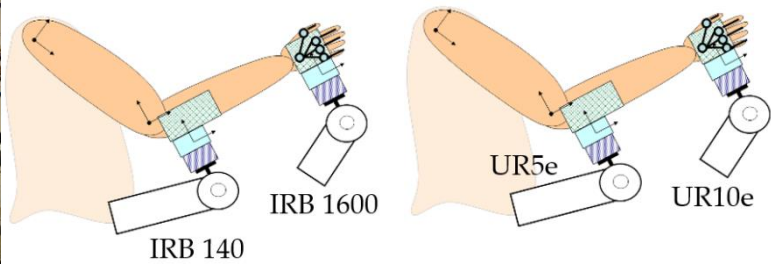
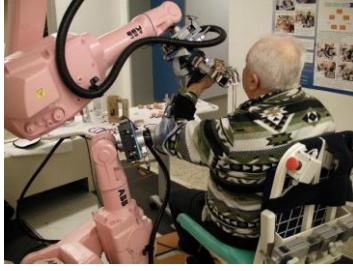
**Kulcsszavak:** robot; rehabilitáció; felső végtag; kinematika; paraméter identifikáció

#### Abstract

*During the rehabilitation of upper limb function loss caused by stroke, the reconstruction of the kinematic model of the limb is the basis for the automatic assessment of patients and the personalization of robotic physiotherapy exercises. The aim is to determine the permanent anatomical parameters of the model: forearm, upper arm and hand lengths, the variable anatomical parameters: shoulder, elbow, wrist positions, and then the anatomical angles. The kinematic model reconstruction presented here does not require prior manual measurement or external sensors data, only the data of the tool coordinate systems of each robotic arm connected to the forearm and hand via the elbow and hand orthoses. First, the reconstruction algorithm of the model is presented in a plane, in two dimensions, which is verified by a virtual limb model created in a CAD system. We then extend the reconstruction algorithm to three dimensions. The mathematical calculations are performed in Wolfram Mathematica system.*

## 1. BEVEZETÉS

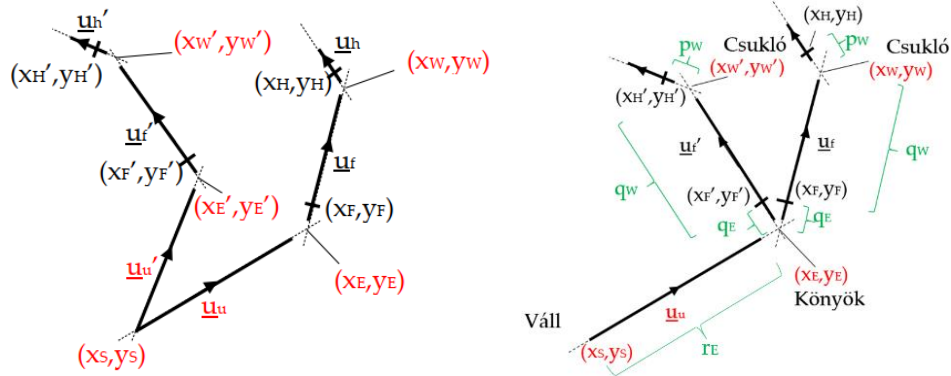
Az emberi váll egy három szabadságfokú gömbcsuklóval, az emberi könyök egy egyszabadságfokú rotációs csuklóval, az emberi csukló pedig a vállhoz hasonlóan szintén egy három szabadságfokú gömbcsuklóval modellezhető [1,2,4,5]. Az emberi kar a mi esetünkben a kézfejre és a könyökre helyezett ortéziseken keresztül fog a robotokkal együtt egy teljes rendszert alkotni. A kutatási célkitűzésünk egy olyan modell rekonstrukciós módszer kidolgozása, amely a két robot (2-3. ábrán: UR5e illetve IRB140, UR10e illetve IRB1600) szerszámkoordináta rendszereinek ismeretében előállítja a váll, a könyök és a csukló ízületi koordináta rendszereinek térbeli helyeit.



1-2-3. ábra Adatgyűjtési összeállítás [3]: Bal oldalt: jelenlegi REHAROB gyógytornáztató rendszer, középen: jelenlegi rendszer két robokarja, jobb oldal: tervezett új rendszer két robotkarja

## 2. A REKONSTRUKCIÓ ALGORITMUSA SÍKBAN

A két robot szerszámkoordináta-rendszereinek (TCPF: Tool Center Point Frame) pozíció és orientáció adatait le lehet kérdezni, melyekből meghatározandó a váll, könyök, csukló középpontjai, illetve az alkar és a felkar hossza. Ehhez ismerni kell a robotokhoz kapcsolódó ortézisek geometriáját, azaz az ortézis által megvalósított robot TCPF módosító transzformációt. Ezzel a transzformációval meg tudjuk határozni a kézfej és az alkar egy bizonyos pontját. A 4-5. ábrán feketével jelöltük az ismert, pirossal a kiszámítandó paramétereket.



4-5. ábra Síkbeli feladat

Az ábrán a felkar a váll és könyök középpontját, az alkar a könyök és a csukló középpontját összekötő síkbeli szakasz mutatja. A kézfej a csukló végpontját jelölő félegyenes. Az alkaron és a kézfej egyeneseken ismerünk egy-egy pontot, ezek az  $(x_f, y_f)$  és  $(x_h, y_h)$  pontok és egy új karállásba mozdulás után ezek vesszős változatai. A szakaszok, mint egyenesek egyenleteit általánosan felírhatjuk az alábbi módon:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (1)$$

(1)-be helyettesítve az egyenesek, szakaszok végpontjait és az ismert adatokkal felírhatók az alábbiak:

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_h \\ y_h \end{pmatrix} - p_w \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (2) \quad \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \end{pmatrix} - q_e \cdot \begin{pmatrix} d \\ e \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \end{pmatrix} + q_w \cdot \begin{pmatrix} d \\ e \end{pmatrix} \quad (3) \quad \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix} + r_e \cdot \begin{pmatrix} g \\ h \end{pmatrix} \quad (5)$$

A (2)-es és (3) egyenletekkel meghatározható a csukló pozíciója:

$$p_w = \frac{e \cdot (x_h - x_f) - d \cdot (y_h - y_f)}{a \cdot e - b \cdot d} \quad (6) \quad x_w = \frac{-b \cdot d \cdot x_h + a \cdot e \cdot x_f + a \cdot d \cdot y_h - a \cdot d \cdot y_f}{a \cdot e - b \cdot d} \quad (8)$$

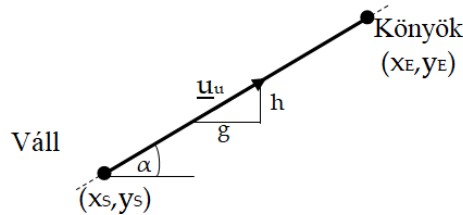
$$q_w = \frac{-b \cdot (x_h - x_f) + a \cdot (y_h - y_f)}{a \cdot e - b \cdot d} \quad (7) \quad y_w = \frac{-b \cdot e \cdot x_h + b \cdot e \cdot x_f + a \cdot e \cdot y_h - b \cdot d \cdot y_f}{a \cdot e - b \cdot d} \quad (9)$$

A könyök és váll pozíciójának meghatározásához 8 db egyenletet írtunk fel 12 ismeretlennel. Így kellenek még további egyenletek a megoldáshoz. Mivel eddig csak egy karállást vizsgáltunk, így megvizsgáltuk, hogy egy másik karállásba való mozgás milyen plusz információkkal járna. Az 1. ábra mutat egy második lehetséges karállást is, erre is felírtuk a (2), (3), (4), (5)-höz hasonló egyenleteket:

$$\begin{pmatrix} x_W' \\ y_W' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_H' \\ y_H' \end{pmatrix} - p_W \cdot \begin{pmatrix} a' \\ b' \end{pmatrix} \quad (10) \quad \begin{pmatrix} x_E' \\ y_E' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_F' \\ y_F' \end{pmatrix} - q_E \cdot \begin{pmatrix} d' \\ e' \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} x_W' \\ y_W' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_F' \\ y_F' \end{pmatrix} + q_W \cdot \begin{pmatrix} d' \\ e' \end{pmatrix} \quad (11) \quad \begin{pmatrix} x_E' \\ y_E' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_S' \\ y_S' \end{pmatrix} + r_E \cdot \begin{pmatrix} g' \\ h' \end{pmatrix} \quad (13)$$

Kaptunk 8 új egyenletet, melyekből 2 azonosságot ad (11), a (10)-es egyenlet pedig azonnal megadja a csukló új pozícióját (6) és (7) szerint. Így (12) és (13) ad új információt. A felkar irányvektora is egységvektor, mely egy bizonyos nagyságú szöveget zár be a vízszintes tengellyel, így ezek felírhatók az alábbi formában:



6. ábra Felkar irányának leírására bevezetett változók

$$\begin{pmatrix} x_E \\ y_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \end{pmatrix} + r_E \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (14) \quad \begin{pmatrix} x_E' \\ y_E' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_S' \\ y_S' \end{pmatrix} + r_E \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha' \\ \sin \alpha' \end{pmatrix} \quad (15)$$

A (14), (15) egyenletek az (5) és (13)-as egyenleteket váltják fel. Ezt kihasználva az első karállás után 8 e-gyenletünk lett 11 ismeretlennel, két karállás után 14 db egyenletünk lett 16 db ismeretlennel. Az ismeretlenek lis-tája: a váll  $2 \times 2$  koordinátája, a könyök  $2 \times 2$  koordinátája, a csukló  $2 \times 2$  koordinátája, illetve a  $p_w$ ,  $q_w$ ,  $q_e$ ,  $r_e$  hossz-paraméterek. A felírt egyenletek: (2), (3), (4), (14), (10), (12), (15).

Kihasználva, hogy a felkar irányvektora egységvektor, a második karállás felírása után észrevehető, hogy az egyenletek száma 6-tal, míg az ismeretlenek száma 5-tel nőtt. Következésképp meg tudjuk mondani, hány karállás után fogjuk tudni megmondani az összes hiányzó ismeretlent:

Síkbeli feladat megoldhatósága

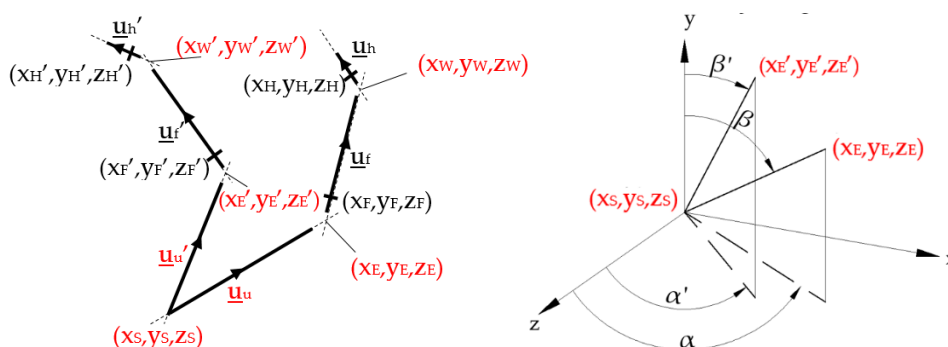
1. táblázat

Karállás	Ismeretlen	Egyenlet
1	11	8
2	16	14
3	21	20
4	26	26

A két sorozat egyenlőségét 4 karállásnál érjük el. Ez azt jelenti, hogy ki lehet számítani a fenti egyenletrendszer szerint a karparamétereket, majd ezeket felhasználva direkt egyenleteket felírva meghatározhatók minden pillanatban a váll-könyök-csukló pozíciói és a felkar-alkar hossza síkbeli mozgás esetén.

### 3. A REKONSTRUKCIÓ ALGORITMUSA TÉRBEN

Ugyanazt az algoritmust használtuk térben is, mint síkban; a különbség az, hogy a kapott pozíció és orientációs vektorok 3 koordinátát tartalmaznak. A térbeli esetet a 7-8. ábra mutatja meg. A síkbeli eset térben:



7-8. ábra Térbeli feladat

$$\begin{pmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{pmatrix} - p_W \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{pmatrix} - q_E \cdot \begin{pmatrix} d \\ e \\ f \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{pmatrix} + q_W \cdot \begin{pmatrix} d \\ e \\ f \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} + r_E \cdot \begin{pmatrix} g \\ h \\ i \end{pmatrix} \quad (19)$$

(16) és (17) azonnal megadja  $p_W$  és  $q_W$  értékét és a csukló pozícióját, felhasználva az első két-két koordináta-egyenletet. Az első karállás után 16 ismeretlenünk lett 12 egyenlettel. Az egyenletrendszernek végtelen sok meg-oldása van, így további egyenleteket kell még felírni. Kihasználható, hogy a könyök középpontja a váll közép-pontja körül egy gömb felületén mozog, így a felkar esetén a könyök középpontjának helye gömbi koordinátákkal felírható. Kihasználva, hogy az irányvektor hossza 1, így a következők írhatók még fel (19) helyett:

$$\begin{pmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} + r_E \cdot \begin{pmatrix} \sin\alpha \cdot \cos\beta \\ \sin\alpha \cdot \sin\beta \\ \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (20)$$

Így 11 egyenletet írhattunk fel 15 ismeretlennel. Második karállás esetén a következők írhatók fel:

$$\begin{pmatrix} x_W' \\ y_W' \\ z_W' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_H' \\ y_H' \\ z_H' \end{pmatrix} - p_W \cdot \begin{pmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} x_E' \\ y_E' \\ z_E' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_F' \\ y_F' \\ z_F' \end{pmatrix} - q_E \cdot \begin{pmatrix} d' \\ e' \\ f' \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} x_W' \\ y_W' \\ z_W' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_F' \\ y_F' \\ z_F' \end{pmatrix} + q_W \cdot \begin{pmatrix} d' \\ e' \\ f' \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} x_E' \\ y_E' \\ z_E' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} + r_E \cdot \begin{pmatrix} \sin\alpha' \cdot \cos\beta' \\ \sin\alpha' \cdot \sin\beta' \\ \cos\alpha' \end{pmatrix} \quad (24)$$

A (22)-es egyenlet azonosságot ad, így új információt nem ad. 9 új egyenletet írtunk fel 8 új ismeretlennel. Így ezt a tendenciát kihasználva itt is meghatározható, hány karállásra van szükség a váll-könyök-csukló pozíciójának és a felkar-alkar hosszának kiszámításához.

Térbeli feladat esetén 5 ilyen karállást kell felvenni, hogy meg tudjuk határozni a karpáramétereket. Természetesen ezeknek a felvett adatoknak függetleneknek és különbözőeknek kell lenni egymástól, hogy ténylegesen eredményt adjon.

Térbeli feladat megoldhatósága

2. táblázat

Karállás	Ismeretlen	Egyenlet
1	15	11
2	23	20
3	31	29
4	39	38
5	47	47

## 4. ÖSSZEGZÉS

Kimutattuk, hogy síkbeli esetben legalább 4, míg térbeli esetben legalább 5 karállásra van szükség ahhoz, hogy meg tudjuk határozni az emberi kar váll-könyök-csukló középpontjainak pozícióját és a felkar-alkar hosszát. A robotok a bemenő adatokat a használt rendszerünkben 500 Hz frekvenciával fogják tudni kiküldeni, ami azt is jelenti, hogy az utolsó karállás felvételekor gyakorlatilag azonnal meghatározhatók lesznek a karpaméterek a gyógytornászok által használt manuális mérési módszer többperces idejével szemben. Praktikusan, több karállás adatainak statisztikai feldolgozása után célszerű ezeknek a geometriai méretek névleges értékét és a szórását kiszámítani.

## KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Az előadó részvételét az OGÉT 2020 konferencián az NTP-HHTDK-19-0068 azonosítójú, „A hazai Tudományos Diákköri műhelyek és rendezvények támogatása” pályázat támogatta.

A K\_125263/125357 és 2017-2.3.7-TÉT-IN-2017-00048 számú projekteket a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatala támogatta a K\_17 és TÉT\_17\_IN kódszámú pályázatokon keresztül. A munkát a BME-Biotechnológia Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Programja támogatta (BME FIKP-BIO).

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] AL-FAIZ, M.Z., ALI, A.A., MIRY, A. H. (2011): Human Arm Inverse Kinematic Solution Based Geometric Relations and Optimization Algorithm. International Journal of Robotics and Automation (IJRA), Volume 2, Issue 4, 2011., p. 245-255.
- [2] MIHELJ, M. (2006): Human Arm Kinematics for Robot Based Rehabilitation. Robotica, Volume 24, Issue 03, p.377-383., 10.1017/S0263574705002304.
- [3] TOTH A., FAZEKAS G., MAGYAR, G., STEPAN, G.: Robot Assistance to Reach-and-grasp Therapy for Stroke Subjects in Five Activities of Daily Living, 4th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunication, Budapest, Hungary, Dec 2-5, 2013, 885-888
- [4] ZANCHETTIN, A.M., ROCCO, P, BASCETTA, L, SYMEONIDIS, I, PELDSCHUS, S. (2011): Kinematic analysis and synthesis of the human arm motion during a manipulation task. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, p. 2692-2697., 10.1109/ICRA.2011.5979654.
- [5] TOLANI, D, GOSWAMI, A., BADLER, N. I. (2000): Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs. Graphical Models, Volume 62, Issue 5, p. 353-388., ISSN 1524-0703.